

کاربرد نانوذرات مغناطیسی در تصفیه فاضلاب

ندا بیانی^۱، فرزین بیانی^۲۱- دانشجوی کارشناسی شیمی کاربردی دانشگاه سراسری تبریز (nbayani72@gmail.com)۲- فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی شیمی دانشگاه مراغه (farzinbaya@yahoo.com)

خلاصه

این مقاله به صورت مروری به بررسی کاربرد نانوذرات مغناطیسی، به ویژه مگنتیت (Fe_3O_4) و مگهمیت ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) در حذف آلاینده‌های مختلف از محیط‌های آبی می‌پردازد. همچنین مهم‌ترین روش‌های سنتز این نانوذرات شامل هم‌رسوبی، سل-ژل، هیدروترمال و سنتز سبز معرفی و از نظر مزایا و محدودیت‌ها مورد بحث قرار گرفته‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که نانوذرات مغناطیسی با توجه به بازده بالای حذف آلاینده‌ها، قابلیت بازیابی و استفاده مجدد، پتانسیل بالایی برای توسعه فرایندهای کارآمد، اقتصادی و سازگار با محیط زیست در تصفیه فاضلاب دارند، هرچند چالش‌هایی نظیر تجمع ذرات و ملاحظات زیست محیطی همچنان نیازمند بررسی‌های بیشتر است.

کلمات کلیدی: نانوذرات مغناطیسی، تصفیه فاضلاب، فلزات سنگین، رنگ‌های صنعتی، نانوفناوری محیط زیست

۱. مقدمه

با افزایش فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و شهری، آلودگی منابع آب به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی تبدیل شده است. تخلیه فاضلاب‌های حاوی آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین، رنگ‌های صنعتی و ترکیبات آلی پایدار به منابع آبی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های طبیعی محسوب می‌شود. بسیاری از روش‌های متداول تصفیه فاضلاب، از جمله فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مرسوم، در حذف کامل این آلاینده‌ها با محدودیت‌هایی از نظر کارایی، هزینه و تولید لجن ثانویه مواجه است [۱].

در این راستا، نانوفناوری به عنوان یکی از رویکردهای نوین علمی، راهکارهای مؤثری برای بهبود فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب ارائه داده است. استفاده از نانومواد به دلیل سطح، ویژه بالا، واکنش پذیری مناسب و قابلیت اصلاح سطح، موجب افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها در مقایسه با مواد جاذب معمولی شده است [۲].

در میان نانومواد مختلف، نانوذرات مغناطیسی توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. این نانوذرات که عمدتاً شامل اکسیدهای آهن نظیر مگنتیت (Fe_3O_4) و مگهمیت ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) هستند، علاوه بر ظرفیت جذب بالا، قابلیت جداسازی سریع و آسان از محیط آبی توسط میدان مغناطیسی خارجی را دارا می‌باشد [۳]. این ویژگی نیاز به مراحل پیچیده فیلتراسیون یا سانتریفیوژ را کاهش داده و امکان بازیابی و استفاده مجدد از نانوذرات را فراهم می‌کند.

علاوه بر این، امکان اصلاح سطح نانوذرات مغناطیسی با گروه‌های عاملی مختلف، سبب افزایش انتخاب پذیری و بهبود

عملکرد آن‌ها در حذف آلاینده‌های خاص نظیر یون‌های فلزی سمی و رنگ‌های آلی می‌شود [۴]. با وجود مطالعات گسترده انجام شده در این زمینه، همچنان مقایسه جامع روش‌های سنتز نانوذرات مغناطیسی و بررسی کاربرد آن‌ها در حذف انواع آلاینده‌های فاضلاب از نظر کارایی و ملاحظات زیست محیطی ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این مقاله مروری، بررسی کاربرد نانوذرات مغناطیسی در تصفیه فاضلاب، معرفی و مقایسه مهم‌ترین روش‌های سنتز، تشریح مکانیسم‌های حذف آلاینده‌ها و همچنین بررسی مزایا و چالش‌های پیش روی استفاده از این نانومواد در فرآیندهای تصفیه می‌باشد.

۲. معرفی کلی کاربرد نانوذرات مغناطیسی

نانوذرات مغناطیسی به دلیل برخورداری از سطح ویژه بالا، واکنش‌پذیری مناسب و قابلیت جداسازی سریع با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، به عنوان یکی از کارآمدترین نانومواد در فرآیندهای تصفیه فاضلاب مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳]. این ویژگی‌ها موجب شده است که استفاده از نانوذرات مغناطیسی در مقایسه با جاذب‌های متداول، راندمان حذف آلاینده‌ها افزایش یافته و مراحل جداسازی پس از تصفیه ساده‌تر شود. کاربرد اصلی نانوذرات مغناطیسی در تصفیه فاضلاب، جذب و حذف آلاینده‌های مختلف از محیط‌های آبی است. این آلاینده‌ها شامل فلزات سنگین، رنگ‌های صنعتی و ترکیبات آلی پایدار می‌باشند که حضور آن‌ها حتی در غلظت‌های کم می‌تواند اثرات زیان‌باری بر سلامت انسان و محیط زیست داشته باشد [۴]. مطالعات نشان داده است که نانوذرات مغناطیسی، به ویژه اکسیدهای آهن، به دلیل برهمکنش‌های سطح قوی، توانایی بالایی در حذف این آلاینده‌ها از محلول‌های آبی دارند [۵].

یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از نانوذرات مغناطیسی، امکان بازیابی سریع و مجدد از آن‌ها بدون نیاز به فرآیندهای پیچیده جداسازی است. پس از انجام فرآیند جذب، این نانوذرات به راحتی توسط یک میدان مغناطیسی خارجی از محلول جدا شده و می‌توان آن‌ها را در چرخه‌های بعدی تصفیه مورد استفاده قرار داد [۳]. این ویژگی نه تنها موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود، بلکه اثرات زیست محیطی ناشی از مصرف جاذب‌های یکبار مصرف را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر این، اصلاح سطح نانوذرات مغناطیسی با استفاده از پلیمرها، سورفاکتانت‌ها یا گروه‌های عاملی آلی، امکان بهبود انتخاب‌پذیری و افزایش ظرفیت جذب آن‌ها را فراهم می‌کند. این اصلاحات سطحی سبب می‌شوند که نانوذرات برای حذف آلاینده‌های خاص، عملکرد بهتری از خود نشان دهند و کاربرد آن‌ها در تصفیه انواع مختلف فاضلاب‌های صنعتی و شهری گسترش یابد [۶].

۳. حذف فلزات سنگین و مکانیسم جذب

یکی از مهم‌ترین کاربردهای نانوذرات مغناطیسی در تصفیه فاضلاب، حذف یون‌های فلزات سنگین نظیر سرب (Pb^{2+})، کادمیوم (Cd^{2+})، و کروم شش ظرفیتی ($Cr(VI)$) از محیط‌های آبی است [۵]. این فلزات به دلیل سمیت بالا، پایداری شیمیایی و قابلیت تجمع زیستی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و موجودات زنده به شمار می‌روند. نانوذرات مغناطیسی به دلیل سطح ویژه بالا و حضور سایت‌های فعال سطحی، توانایی بالایی در جذب یون‌های فلزی از محلول‌های آبی دارند. علاوه بر این، امکان اصلاح سطح این نانوذرات با گروه‌های عاملی مختلف نظیر گروه‌های آمینی،

کربوکسیلی و تیولی، موجب افزایش ظرفیت جذب و انتخاب پذیری آن‌ها نسبت به یون‌های فلزی خاص می‌شود [۶]. به عنوان مثال، اصلاح سطح نانوذرات مغناطیسی با گروه‌های آمینی، نقش موثری در افزایش جذب یون‌های Cd^{2+} و Pb^{2+} ایفا می‌کند.

مکانیسم‌های حذف فلزات سنگین توسط نانوذرات مغناطیسی معمولاً شامل جذب فیزیکی، تبادل یونی و کمپلکس‌سازی شیمیایی است. در جذب فیزیکی، یون‌های فلزی به واسطه نیروهای الکترواستاتیکی و واندروالسی به سطح نانوذرات متصل می‌شوند. در مکانیسم تبادل یونی، یون‌های فلزی با یون‌های موجود بر سطح نانوذرات جایگزین شده و به ساختار جاذب متصل می‌گردند. همچنین در کمپلکس‌سازی شیمیایی، پیوندهای کووالانسی یا شبه‌کووالانسی بین یون‌های فلزی و گروه‌های عاملی سطح نانوذرات تشکیل می‌شود که منجر به افزایش پایداری فرآیند جذب می‌گردد [۶]. شرایط عملیاتی نظیر محلول، دما، زمان تماس و غلظت اولیه یون‌های فلزی تأثیر قابل‌توجهی بر کارایی فرآیند جذب دارند. به‌طور کلی، افزایش pH محلول تا محدوده خنثی یا کمی قلیایی، موجب افزایش جذب بسیاری از یون‌های فلزی می‌شود، در حالی که برای یون Cr(VI) جذب مؤثرتر معمولاً در شرایط اسیدی گزارش شده است [۵]. پس از فرآیند جذب، نانوذرات مغناطیسی به راحتی توسط میدان مغناطیسی خارجی از محلول جدا می‌شوند و می‌توان آن‌ها را پس از شست‌وشو و بازیابی، در چرخه‌های متوالی تصفیه مورد استفاده قرار داد. این ویژگی، علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، موجب افزایش پایداری و کارایی فرآیند تصفیه فاضلاب می‌شود [۵].

۴. حذف رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی

علاوه بر فلزات سنگین، نانوذرات مغناطیسی توانایی قابل توجهی در حذف رنگ‌های صنعتی و ترکیبات آلی پایدار از فاضلاب‌ها دارند [۷]. رنگ‌های صنعتی نظیر متیلن بلو، رودامین B و متیل اورنج به دلیل ساختار آروماتیکی پیچیده، پایداری شیمیایی بالا و مقاومت در برابر تجزیه زیستی، از جمله آلاینده‌های خطرناک در فاضلاب‌های نساجی، چاپ و رنگرزی محسوب می‌شوند.

نانوذرات مغناطیسی به دلیل سطح فعال بالا و امکان اصلاح سطح، قادر به جذب مؤثر این ترکیبات آلی از محیط‌های آبی هستند. مکانیسم حذف رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی معمولاً شامل جذب سطحی، برهم کنش‌های الکتروستاتیکی، پیوندهای هیدروژنی و کمپلکس‌سازی است [۸]. نوع و شدت این برهم کنش‌ها به عواملی نظیر ساختار شیمیایی آلاینده، pH محلول و نوع اصلاح سطح نانوذرات بستگی دارد.

در برخی کاربردها، نانوذرات مغناطیسی اصلاح شده می‌توانند علاوه بر جذب، نقش کاتالیزوری نیز ایفا کنند. ترکیب نانوذرات مغناطیسی با نیمه هادی‌هایی نظیر TiO_2 یا پوشش دهی آن‌ها با مواد فعال نوری، امکان تجزیه آلاینده‌های آلی پایدار تحت تابش نور را فراهم می‌کند و منجر به کاهش قابل توجه غلظت این ترکیبات در مدت زمان کوتاه می‌شود [۷، ۸]. از دیگر مزایای استفاده از نانوذرات مغناطیسی در حذف رنگ و آلاینده آلی، قابلیت جداسازی سریع آن‌ها پس از فرآیند تصفیه است. این ویژگی باعث می‌شود که نیاز به مراحل پیچیده فیلتراسیون کاهش یافته و فرآیند تصفیه از نظر اقتصادی و زیست محیطی مقرون به صرفه تر گردد. همچنین امکان بازیابی و استفاده مجدد از نانوذرات مغناطیسی، پایداری فرآیند تصفیه را افزایش می‌دهد [۷].

۵. سنتز نانوذرات مغناطیسی

روش های مختلفی برای سنتز نانوذرات مغناطیسی، به ویژه اکسیدهای آهن نظیر مگنتیت (Fe_3O_4) و مگهمیت ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)، توسعه یافته است که هر یک از آنها دارای مزایا و محدودیت های خاص خود می باشند. انتخاب روش مناسب سنتز نقش مهمی در تعیین اندازه، خواص مغناطیسی و کارایی نانوذرات در فرآیندهای تصفیه فاضلاب دارد.

۵.۱- روش هم رسوبی : روش هم رسوبی یکی از ساده ترین و متداول ترین روش ها برای سنتز نانوذرات مغناطیسی، به ویژه مگنتیت، محسوب می شود [۹]. در این روش، نمک های آهن دوظرفیتی و سه ظرفیتی نظیر FeCl_2 , FeCl_3 در محیط آبی و تحت شرایط قلیایی با یکدیگر واکنش داده و نانوذرات مغناطیسی تشکیل می دهند. پارامترهایی مانند pH محلول، دما، نسبت یون های آهن و سرعت هم زدن، تأثیر مستقیمی بر اندازه و یکنواختی نانوذرات حاصل دارند [۱۰]. سادگی فرآیند، هزینه پایین و امکان تولید در مقایسه بالا از مهم ترین مزایای این روش به شمار می رود. با این حال، کنترل دقیق اندازه ذرات و جلوگیری از تجمع نانوذرات از جمله چالش های این روش محسوب می شود [۹].

۵.۲- روش سل-ژل : یکی از روش های پر کاربرد برای سنتز نانوذرات مغناطیسی با توزیع اندازه یکنواخت و خلوص بالا است [۱۱]. در این روش، پیش ماده های فلزی در یک محیط مایع حل شده و طی فرآیندهای هیدرولیز و تراکم، ساختار ژل مانند تشکیل می دهند که پس از عملیات حرارتی، نانوذرات مغناطیسی حاصل می شود. از مزایای این روش می توان به کنترل منسب ترکیب شیمیایی، یکنواختی اندازه ذرات و امکان اصلاح ساختار نانوذرات اشاره کرد. با این حال، زمان بر بودن فرآیند و هزینه بالاتر تولید نسبت به روش هم رسوبی، از محدودیت های اصلی آن به شمار می رود [۱۱، ۱۲].

۵.۳- روش هیدروترمال : روش هیدروترمال بر پایه انجام واکنش های شیمیایی در دما و فشار بالا در محیط آبی انجام می شود و برای تولید نانوذرات مغناطیسی با بلورینگی و خواص مغناطیسی مطلوب مورد استفاده قرار می گیرد [۱۳]. در این روش، محلول پیش ماده ها در یک راکتور (اتوکلاو) تحت شرایط کنترل شده قرار گرفته و به نانوذراتی با اندازه و فورمولوژی مشخص تبدیل می شود.

کنترل مناسب شکل و اندازه ذرات از مزایای اصلی این روش است، اما نیاز به تجهیزات خاص و هزینه های بالاتر، کاربرد گسترده آن را محدود می کند [۱۳].

۵.۴- روش سنتز سبز : در سال های اخیر، روش سنتز سبز نانو ذرات مغناطیسی به عنوان رویکردی سازگار با محیط زیست مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱۴]. در این روش ها از عصاره های گیاهی، میکروارگانیسم ها یا مواد طبیعی به عنوان عامل کاهنده و پایدارکننده استفاده می شود.

کاهش مصرف مواد شیمیایی سمی، هزینه کمتر و سازگاری زیست محیطی از مهم ترین مزایای این روش ها هستند. با این حال، کنترل اندازه، یکنواختی و تکرارپذیری نانوذرات سنتز شده همچنان از چالش های اصلی سنتز سبز محسوب می شود [۱۴، ۱۵].

۶. مزایا و چالش‌ها

استفاده از نانوذرات مغناطیسی در تصفیه فاضلاب دارای مزایای متعددی است که باعث برتری این نانومواد نسبت به جاذب‌های متداول می‌شود. مهم‌ترین این مزایا عبارت‌اند از [۱۶، ۱۷]:

- بازیابی سریع و آسان: جداسازی نانوذرات پس از فرآیند جذب با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، فرآیند تصفیه را ساده و اقتصادی می‌کند.
- افزایش بازده حذف آلاینده‌ها: سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری مناسب موجب جذب مؤثر فلزات سنگین، رنگ‌ها و ترکیبات آلی پایدار می‌شود.
- امکان استفاده مجدد: پس از بازیابی، نانوذرات می‌توانند در چرخه‌های بعدی تصفیه مورد استفاده قرار گیرند که منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود.
- قابلیت اصلاح سطح: امکان پوشش‌دهی یا اتصال گروه‌های عاملی مختلف بر سطح نانوذرات، انتخاب‌پذیری و ظرفیت جذب آن‌ها را برای آلاینده‌های خاص افزایش می‌دهد.
- سازگاری با محیط زیست: به ویژه در روش‌های سنتز سبز، مصرف مواد شیمیایی سمی کاهش یافته و فرآیند تصفیه از نظر زیست‌محیطی بهینه می‌شود.

با وجود این مزایا، استفاده از نانوذرات مغناطیسی با چالش‌هایی نیز همراه است:

- تجمع ذرات: نانوذرات به دلیل انرژی سطحی بالا تمایل به تجمع دارند که می‌تواند سطح فعال آن‌ها را کاهش دهد.
- کاهش کارایی در چرخه‌های مکرر: پس از چندین بار بازیابی، ظرفیت جذب برخی نانوذرات ممکن است کاهش یابد.
- سمیت احتمالی: آزاد شدن ذرات در محیط زیست ممکن است اثرات نامطلوبی بر موجودات زنده داشته باشد.
- هزینه سنتز با خلوص بالا: تولید نانوذرات با اندازه، مورفولوژی و خواص مغناطیسی دقیق، به ویژه در مقیاس صنعتی، هزینه‌بر است.

پژوهش‌های اخیر بر توسعه روش‌های اصلاح سطح، سنتز سبز و افزایش پایداری نانوذرات متمرکز شده‌اند، تا این محدودیت‌ها به حداقل برسد و کاربرد عملی نانوذرات مغناطیسی در تصفیه فاضلاب افزایش یابد [۱۶، ۱۷].

۷. پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، استفاده از نانوفناوری در تصفیه آب و فاضلاب به طور گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که نانوذرات مغناطیسی، به ویژه اکسیدهای آهن مگنتیت (Fe_3O_4) و مگهمیت ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)، به دلیل سطح ویژه بالا و قابلیت جداسازی آسان توسط میدان مغناطیسی خارجی، کارایی بالایی در حذف آلاینده‌های مختلف از فاضلاب دارند.

احمد و همکاران [۳] استفاده از نانوذرات را برای حذف فلزات سنگین بررسی کرده و بازده بالای این نانوذرات در جذب یون‌های فلزی را گزارش کردند. همچنین گاپتا و همکاران [۴] نشان دادند که نانوذرات مغناطیسی اصلاح‌شده قادر به حذف مؤثر رنگ‌های صنعتی و ترکیبات آلی پایدار هستند. وو و همکاران [۶] مکانیسم‌های اصلی آلاینده‌ها توسط این نانوذرات را شامل جذب سطحی، تبادل یونی و کمپلکس‌سازی شیمیایی معرفی کردند.

در زمینه سنتز، روش‌هایی مانند هم‌رسوبی، سل-ژل، هیدروترمال و سنتز سبز برای تولید نانوذرات مغناطیسی توسعه یافته‌اند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌هایی از نظر کنترل اندازه، هزینه و سازگاری زیست‌محیطی هستند [۹-۱۵].

وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی نظیر تجمع نانوذرات و کاهش کارایی در استفاده‌های مکرر همچنان مطرح است که ضرورت انجام مطالعات مروری در این حوزه را نشان می‌دهد.

۸. پرسش‌های پژوهش

۱. نانو ذرات مغناطیسی چه تأثیری بر کارایی حذف آلاینده‌های مختلف دارند؟
۲. کدام سنتز برای تولید نانوذرات با کارایی بالا و قابلیت بازیابی مناسب بهتر است؟
۳. مزایا و محدودیت‌های استفاده از نانوذرات مغناطیسی در تصفیه فاضلاب چیست؟
۴. چگونه می‌توان پایداری و سازگاری زیست محیطی نانوذرات مغناطیسی را در فرآیندهای صنعتی بهبود داد؟

۹. روش تحقیق

در این مقاله از روش‌های مطالعاتی اسنادی و مراجعه به کتب نشریات و سایت‌های علمی مرتبط و یادداشت برداری و فیش برداری، برای رسیدن به تحقیق و نتیجه مقاله بهره گرفته شده است.

۱۰. نتیجه‌گیری

نانوذرات مغناطیسی با ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از جمله سطح ویژه بالا، قابلیت اصلاح سطح و جداسازی آسان، از مؤثرترین نانومواد در تصفیه فاضلاب هستند. این نانومواد در توانایی حذف فلزات سنگین، رنگ‌ها و ترکیبات آلی پایدار را داشته و بازیابی آسان، کاهش مصرف مواد شیمیایی و امکان استفاده مجدد، فرآیند تصفیه را اقتصادی‌تر می‌کند. چالش‌هایی مانند تجمع ذرات، کاهش کارایی در چرخه‌های مکرر و هزینه‌های سنتز با خلوص بالا وجود دارند، اما پژوهش‌های اخیر با تمرکز بر سنتز سبز و اصلاح سطح، کاربرد عملی این نانوذرات را ارتقا داده است. به طور کلی، استفاده از نانوذرات مغناطیسی در تصفیه فاضلاب نه تنها راهکاری مؤثر برای حذف آلاینده‌ها ارائه می‌دهد، بلکه مسیر را برای توسعه فناوری‌های نوین در محیط زیست هموار می‌سازد.

۱۱. مراجع

- 1.Recent advances in nanotechnology for water and wastewater treatment
- 2.Magnetic nanoparticles: synthesis, properties, and environmental applications
- 3.Z. Ahmad et al., Magnetic nanoparticles for wastewater treatment: A review, Environmental Nanotechnology, 2019

- 4.S. Gupta, M. Gupta, Magnetic nanoparticles in water purification, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020.
- 5.K. Safarifard et al., Heavy metal removal using magnetic nanoparticles, Journal of Hazardous Materials, 2018
- 6.H. Wu et al., Adsorption mechanisms of magnetic nanoparticles for heavy metals, chemical Engineering Journal, 2019.
- 7.A. Zhang et al., Magnetic nanoparticles for removal of dyes and organic pollutants, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019
- 8.L. Li et al., Surface-modified magnetic nanoparticles in water treatment: mechanisms and applications, Chemical Engineering Journal, 2020.
- 9.Massart, R., Preparation of aqueous magnetic liquids, IEEE Transactions on Magnetics, 1981
- 10.Laurent, S., et al., Magnetic iron oxide nanoparticles, Chemical Reviews, 2008
- 11.Brinker, C. J., Scherer, G. w., Sol-gel science, Academic Press, 2013.
- 12.Sanchez, C., et al., Design, Synthesis, and properties of inorganic and hybrid thin films, Chemistry of Materials, 2011.
- 13.Byrappa, K., Yoshimura, M., Handbook of hydrothermal technology, Elsevier, 2012
- 14.Iravani, S., Green synthesis of metal nanoparticles, Green Chemistry, 2011
- 15.Ahmed, S., et al., Green synthesis of iron oxide nanoparticles, Journal of PHotochemistry and PHotobiology B, 2016.
- 16.M. R. Ghaedi et al., Advantages and limitations of magnetic nanoparticles in wastewater treatment, Journal of water Process Engineering, 2018.
- 17.P. K. singh et al., Challenges and perspectives of magnetic nanoparticles in environmental application, Environmental Science: Nano, 2020